

➔ Criterios

Tratamiento de la madera arqueológica saturada de humedad por el método denominado plastinación

Ana Bouzas Abad, Centro de Intervención del IAPH. **José María de Castro Romero**, Dpto. de Anatomía y Embriología Humana de la U. de Cádiz. **Luis Carlos Zambrano Valdivia**, Museo de Cádiz

Resumen

El artículo analiza los antecedentes históricos en la elaboración y aplicación de técnicas para la preservación de materiales diversos, hasta llegar a la creación de la técnica de la plastinación en 1978. Este método de preservación de material orgánico se ha adoptado como herramienta de trabajo en el tratamiento de materiales arqueológicos de procedencia subacuática, a cargo del Centro de Arqueología Subacuática del IAPH. A lo largo de 2006 y 2007 se ha utilizado dicha técnica en la conservación de unas maderas de época romana aparecidas en la ciudad de Huelva.

Palabras clave

Arqueología subacuática | Centro de Arqueología Subacuática | Humedad | Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico | Intervención | Madera | Método Plastinación | Metodología | Saturación | Tratamiento



➡ Restos de madera húmeda de la excavación de la calle Nogales de Huelva. La madera está cubierta y embalada para su extracción / Jesús de Haro Ordóñez, G.I.R.H.A., S.C.

Este trabajo de investigación surge de la propuesta de colaboración expresada por el Catedrático del Departamento de Anatomía y Embriología Humana de la Facultad de Medicina de la Universidad de Cádiz¹, José María de Castro Romero, que conjuntamente con Luis Carlos Zambrano Valdivia, restaurador del Área de Conservación del Centro de Arqueología Subacuática del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico de la Junta de Andalucía, en el año 2003, propusieron la aplicación del método de la plastinación para el tratamiento de materiales orgánicos arqueológicos de procedencia subacuática, realizándose posteriormente en el marco de los proyectos de investigación que desarrolla el IAPH. La puesta a punto de la metodología de trabajo y protocolos a seguir para el tratamiento de la madera saturada de agua se ha llevado a cabo en los años 2006-2007 sobre unas maderas de época romana procedentes de una excavación realizada en la calle José Nogales de la ciudad de Huelva.

ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La creación y aplicación de técnicas para preservar materiales diversos ha sido consustancial al hombre, obligado a su diseño para la conservación, en primer lugar, de los alimentos, con objeto de poder sobrevivir a las épocas de escasez. También la preservación de las pieles, obtenidas por el hombre cazador, era absolutamente necesaria para cubrirse con ellas. El sentimiento religioso en estos hombres primitivos les llevó por otro lado a conservar restos humanos con el fin de mantenerlos en condiciones óptimas para la nueva vida que les esperaba una vez fallecidos.

Para realizar estas operaciones el hombre empleaba métodos basados en la observación de lo que ocurría en la naturaleza. Así empleó la desecación, la infiltración con sal común, la ebullición en éter, etc. A lo largo de miles de años el hombre fue encontrando nuevos productos que podían ayudarle a sus fines. De este modo su bagaje se fue haciendo cada vez más amplio con el devenir de los siglos. Es el caso del siglo XVIII, con las grandes expediciones científicas realizadas, sobre todo por las potencias coloniales, con objeto de conocer los recursos de todo tipo de los grandes territorios inexplorados, que generaron enormes colecciones de materiales que requerían inexcusablemente su conservación. Estas colecciones una vez estabilizadas eran expuestas al público. Surgieron así los grandes museos que llevaban implícitos en su diseño la necesidad de grandes laboratorios donde las piezas traídas eran preparadas, conservadas y dispuestas para la exposición.

Los materiales de conservación incluían líquidos en los cuales se sumergían las piezas que quedaban en grandes vasijas de cristal en un líquido que cumplía la doble función de impedir la putrefacción y ser transparentes para que de esta manera pudieran ser vistas sin problema en las vitrinas.

Por estas mismas fechas surgen avances importantes en el diseño de los aparatos científicos destinados al análisis microscópico. La mayor resolución que alcanzan los nuevos microscopios obliga a aplicar a los materiales objeto de estudio técnicas que permiten realizar secciones de un espesor mínimo. Para ello resulta imprescindible conceder a la pieza una resistencia superior a la que en principio tenía, para que con esa mayor dureza se pueda anular la elasticidad del tejido y realizar un corte histológico.

Se emplean fundamentalmente dos métodos: uno basado en el frío, congelando el tejido, surgiendo así los micrótomos de congelación; y el otro que consiste en infiltrar con un material de mayor dureza la pieza biológica objeto de estudio. Esta infiltración se hace a base de ceras y, al ser estas inmiscibles con el agua que tienen los materiales en su interior, se precisa una técnica previa gracias a la cual se retira el agua sustituyéndola por una sustancia que sí disuelva las ceras. Primero se empleó cera de abejas aunque más tarde fue sustituida por sustancias ceroides obtenidas de la destilación del petróleo, las parafinas. Una vez infiltrada con este material la pieza biológica puede conservarse de manera prácticamente indefinida. Esta técnica es fácil de aplicar en pequeñas piezas, pero en las de gran tamaño resulta prácticamente imposible su aplicación ya que la deshidratación de la pieza y la infiltración con el agente intermedio y con la parafina requiere de unos tiempos que crecen exponencialmente con el tamaño de las piezas.

El ingenio y la perseverancia de trabajo de un profesor de Anatomía español exiliado en Argentina, Pedro Ara, le permitió con el transcurso de los años encontrar un método con el que se podían infiltrar con parafinas masas tan voluminosas como cuerpos humanos enteros. Uno de los casos más conocidos a nivel mundial de la aplicación de esta técnica y de sus magníficos resultados fue la conservación del cuerpo de Evita Perón que, una vez parafinado, ha mantenido su óptimo estado a pesar de las vicisitudes que dicho cuerpo sufrió a lo largo de los años (exilio del general Perón en una villa de Puerta de Hierro en Madrid en cuyo sótano se almacenó el cuerpo durante más de 20 años). Lamentablemente la técnica del profesor Ara no fue publicada y como consecuencia se ha perdido.

En las proximidades de la Segunda Guerra Mundial la química orgánica experimentó un extraordinario auge. Aparecieron nuevas sustancias sintéticas con características totalmente diferentes a las existentes en la naturaleza. Entre estos materiales se debe citar los derivados de destilación del petróleo. En este grupo aparecen las ceras sintéticas conocidas como parafinas, a las que antes se ha aludido, que muy pronto sustituirán a la cera para las inclusiones por sus mejores cualidades. También los polímeros de glicoles (polientilenglicoles) que, al ser miscibles en agua y tener cualidades de las ceras al deshidratarse, y además poseer una dureza variable en razón de su peso



➤ Depósito de ánforas en proceso de documentación, bajo el que se localizaron las maderas / JESÚS DE HARO ORDÓÑEZ, G.I.R.H.A., S.C.



➤ Extracción sistemática depósito de ánforas. Resultado: negativo estratigráfico del depósito / JESÚS DE HARO ORDÓÑEZ, G.I.R.H.A., S.C.

molecular, se emplean en la preparación de tejidos, y muy pronto por su característica de ser solubles en agua, se usarán en la preparación de materiales museísticos, aplicación que conservan hasta la actualidad.

Así mismo surgen en esta época los polímeros elásticos: mercaptanos, poliuretanos y siliconas. Igualmente surgen los primeros plásticos con los que ya en tan tempranas fechas se logró mediante infiltración y posterior catalización conservar piezas en el interior de bloques plásticos transparentes. El polimetacrilato se convertiría así en un colaborador habitual de los museos especialmente para las piezas de tamaño mediano y pequeño.

En los años 70 del pasado siglo un joven técnico de un laboratorio alemán inicia sus trabajos, imitando al profesor Ara, para infiltrar grandes piezas con los elastómeros de reciente descubrimiento para así conseguir preparaciones anatómicas que a la vez que conserven los tejidos permitan en las piezas una excelente elasticidad. Fruto de su perseve-

rancia el profesor Gunther Von Hagens, en 1977, creó un procedimiento de preservación de material biológico, que consistía en extraer los líquidos corporales como el agua y los lípidos por medio de solventes como la acetona fría y tibia para luego sustituirlos por resinas elásticas de silicona y rígidos de epóxicas. Con ello se obtienen piezas rígidas o secciones. Esta técnica, la *plastinación*, fue patentada por el autor en 1978, y le ha permitido no sólo ocupar la cátedra de Anatomía de la Universidad de Heidelberg, sino también crear un verdadero imperio comercial mediante la preparación y exposición comercial de las piezas anatómicas a nivel mundial con lo que finalmente, tras abandonar la Cátedra y la Universidad, ha montado una gran factoría de producción de piezas anatómicas en la China continental en la ciudad de Dalian.

La finalidad inicial de la plastinación era la conservación de material para la enseñanza anatómica humana. Rápidamente se le han encontrado numerosas aplicaciones en otros campos de la ciencia, algunos afines y otros más lejanos. Entre los primeros se destaca su aplicación



➤ Vista occidental del área de excavación. Estado de los restos en proceso de consolidación in situ / JESÚS DE HARO ORDÓÑEZ, G.I.R.H.A., S.C.



➤ Proceso de consolidación in situ de los restos / JESÚS DE HARO ORDÓÑEZ, G.I.R.H.A., S.C.



➤ Proceso de extracción. Módulo de doble cuerpo de aluminio. Últimos preparativos / JESÚS DE HARO ORDÓÑEZ, G.I.R.H.A., S.C.

en Veterinaria para preparar piezas que permitan a los alumnos familiarizarse con las técnicas endoscópicas, la preparación de piezas para servir de guía en los servicios de diagnóstico por la imagen.

El proceso básico de la plastinación, igual que en el de la infiltración de parafina, tiene que seguir una serie de pasos, ninguno de los cuales puede ser obviado si se desea obtener una pieza de gran calidad. Esta técnica es sencilla pero lenta y acelerar los pasos puede provocar el deterioro o la pérdida de la pieza, ya que una vez polimerizada el proceso es irreversible. Para el tratamiento del tejido biológico se debe fijar la pieza mediante formaldehído al 10% (hay otros fijadores que se pueden utilizar). Se puede realizar a diferentes temperaturas y con este paso se produce un proceso de coagulación de las proteínas presentes así como de desnaturalización del DNA. Así mismo se destruyen bacterias presentes en la pieza. Con todo ello se impide su descomposición.

Tras un lavado intenso se deshidrata el objeto empleando como solvente acetona. Este paso puede ser más o menos largo dependiendo de la calidad de la pieza, ya que cuanto más porosa sea más rápidamente se hará la impregnación. Una vez alcanzado un elevado nivel de deshidratación se introduce el baño en el polímero por medio del vacío, lo que provocará la evaporación de la acetona y su sustitución por la silicona. Finalizado el proceso se cataliza la superficie que proseguirá lentamente hasta cristalizar toda la silicona presente en la pieza.

Desde entonces se han producido variantes en la técnica. Después del trabajo del propio Gunther Von Hagens, han surgido nuevas empresas; una de ellas Corcoran, que es el resultado del trabajo conjunto de un grupo de investigadores y el gigante de la industria química *Dupont de Nemours*. Trabajando coordinados han creado una serie de polímeros de menor viscosidad (más fácil infiltración) y que pueden emplearse en un sistema a temperatura ambiente (más rápida infiltración) con lo que se acelera el proceso.

Por otro lado una empresa italiana, *VIS Docta*, también ha puesto en el mercado todo un aparataje y nuevas resinas ofreciendo incluso la posibilidad de desplazar sus equipos a los laboratorios interesados en aplicar esta técnica.

En el campo de la conservación de piezas arqueológicas los pioneros han sido el equipo de arqueología subacuática de la Universidad de Texas (EE.UU.), que aplicó esta técnica con magníficos resultados a piezas extraídas del hundimiento de un navío francés en la costa americana en el siglo XVII. Han aplicado la técnica a los restos más variados obteniendo en general un magnífico resultado y una conservación excelente de las piezas. Se puede mencionar la tesis doctoral de la profesora De la Cruz de la Universidad Autónoma de México, que fue realizada en el Instituto de Conservación de Canadá,

y que, formándose en el INA (Institute of Nautical Archaeology, Texas, USA), ha aportado datos sobre la estabilidad lograda tras el tratamiento de piezas de madera embebidas en agua así como de la resistencia a la exposición lumínica y térmica alcanzada tras el tratamiento que se pueden juzgar como excelentes.

ESTADO DE LA CUESTIÓN

La investigación arqueológica se enfrenta a sus mayores problemas precisamente tras la obtención del hallazgo. Es frecuente que la extracción de una pieza conlleve ciertos riesgos, ya que al haber permanecido en un ambiente determinado durante años, puedan modificarse sus características intrínsecas, que pueden además ir acompañadas de daños más o menos graves e incluso la pérdida total de la pieza. La razón de este deterioro no es otra que la modificación del microclima en el que se ha mantenido durante ese tiempo, que provoca una variación en sus características estructurales, produciendo probablemente la desintegración. Para la conservación arqueológica es básica la preservación de las estructuras, en este caso de los materiales orgánicos como la madera, que es el objeto de este artículo.

Para ello se han realizado pruebas en maderas arqueológicas, en concreto sobre diversas piezas pertenecientes a una supuesta estructura portuaria de época romana y situada en un solar excavado en la ciudad de Huelva. Se ha utilizado las mismas técnicas y mecanismos que se aplican para la conservación de cuerpos o estructuras biológicas.

El equipo de trabajo se planteó la necesidad de combinar dos ciencias dispares: la Anatomía y la Arqueología. De hecho esta unión ha permitido que técnicas histológicas clásicas, como las inclusiones en ceras animales o minerales o el polientilenglicol (PEG), en principio exclusivamente morfológicas, se empleen también con éxito en la conservación de piezas museísticas.

Recientemente se han utilizado técnicas de conservación basadas en la utilización de silicona como agente infiltrante, compuesto de polímeros elastoméricos, originados a partir de la química del silicio que tras un proceso de infiltración por monómeros de baja viscosidad son objeto de polimerización, consiguiéndose con ello la infiltración con materiales de dureza y elasticidad variable a voluntad, y dotados de una alta resistencia a la degradación, lo que convierte el material tratado en prácticamente indestructible después de su tratamiento. Su uso inicial en la Anatomía Humana ha sido aplicado en el tratamiento de otros materiales como momias, textiles, cuero, etc.

La madera húmeda, que es el material del que tratamos, una vez sumergida, experimenta una serie de alteraciones en su composición



Gráfico que representa la estructura de madera / ANA BOUZAS ABAD, IAPH



➡ Pesado de la pieza en báscula digital /
ANA BOUZAS ABAD, IAPH



➡ Cámara de vacío, bomba de vacío, manómetro manual
y digital / ANA BOUZAS ABAD, IAPH



➡ Tratamiento de catalización por pulverización con aerógrafo /
ANA BOUZAS ABAD, IAPH

y estructura que pueden provocar su deterioro más o menos intenso en un plazo variable. La composición del agua, su salinidad, temperatura, pH, concentración de oxígeno en disolución y contaminación bacteriana son, entre otros muchos, algunos de los agentes capaces de modificar su estructura hasta llegar a la fase final de destrucción y disolución en el agua.

La estructura de la madera varía de unas especies a otras, pero todas tienen un patrón similar básico. Este material orgánico que procede de un organismo vivo está formado por asociación de grandes células cilíndricas de paredes con alineamiento radial y tangencial que se encuentran vacías sirviendo de vasos nutricios u ocupados por sustancias nutritivas y resinas o materiales leñosos que dan resistencia a la misma.

Al producirse la inmersión, la pieza, que habitualmente está seca o sólo húmeda superficialmente, se va a ver sometida a una impregnación de agua y sus solutos, que penetra lenta y progresivamente, y sólo se estabilizará al llegar a su equilibrio con la infiltración total de la pieza. Paralelamente se inicia un ataque biológico del material por los microorganismos presentes. Es decir se producen una serie de cambios y procesos de alteración físicos, químicos y biológicos que propician que el material vaya desapareciendo gradualmente.

La madera sufre cambios en su composición química y en su estructura microscópica, lo que hace que desaparezca parte de sus componentes estructurales, que son reemplazados por el agua circundante. Para que este material orgánico se conserve bien es necesario que se cubra rápidamente con el limo, la arena, el fango, etc., y que se cree un ambiente anaerobio para que no se vea afectada por los factores ambientales arriba mencionados.

Estos materiales en estado saturado de agua presentan muchos problemas, ya que las alteraciones de su estructura no son homogéneas, existiendo diferentes grados de deterioro dentro de la misma pieza.

El efecto de la alteración consiste básicamente en la pérdida por hidrólisis de la celulosa que normalmente representa un 40% de la madera seca, así como la hemicelulosa y la lignina. Como resultado de la variación en la composición química de la madera se produce un debilitamiento del tejido celular. En esta situación la tensión superficial del agua durante el secado en los espacios capilares es más grande que la resistencia de las paredes celulares, y es por esta razón que la pérdida de humedad provoca un gran daño en estos espacios, con la consiguiente contracción volumétrica con deformación de la madera.

Por lo tanto, durante los procesos de excavación, extracción y transporte, este material sale a un medio aeróbico, con luz y oxígeno, que debe ser inmediatamente controlado si no se quiere que sufra

graves daños ya que la madera suele presentar alteraciones que se manifiestan principalmente en forma de una extrema debilidad estructural.

Es por eso que cuando se extrae una pieza se deben realizar simultáneamente ciertas tareas antes de su tratamiento final con las resinas poliméricas, en este caso silicona. Hay que extraer el agua del objeto a tratar sin provocar tensiones en la estructura leñosa, distensiones o contracciones que puedan causar el colapso de la pieza. También se debe, con la consolidación, aportar al objeto una resistencia y elasticidad. Al mismo tiempo se disminuye la higroscopicidad y la concentración de sales solubles para que las variaciones climáticas durante su exposición y almacenamiento no provoquen cambios en sus condiciones y forma física.

Para todo ello hay que tener un conocimiento del estado de conservación de la madera tanto macro como microscópicamente. A través de la microscopía electrónica de barrido se puede tener una visión más clara de la situación real de la estructura de la pieza.

METODOLOGÍA DE INTERVENCIÓN. TRATAMIENTO DE LA MADERA

Cualquier tratamiento de conservación de maderas arqueológicas extraídas del medio subacuático debe resolver ineludiblemente dos cuestiones (LÓPEZ DE ROMA, 1985):

- 1) Equilibrar de forma permanente el agua del objeto y el medio ambiente con la menor deformación posible.
- 2) Aumentar la resistencia mecánica del material hasta un grado de consistencia estructural acorde a su tamaño, uso y emplazamiento.

Solucionar estos problemas pasa, generalmente, por utilizar una sustancia consolidante que penetre y permanezca de forma estable en la estructura interna de la madera. La elección del método y los productos más adecuados será el resultado de conciliar las características del objeto y las condiciones de mantenimiento futuro. Así, una gran estructura naval conformada por gruesas secciones de maderos ensambladas entre sí no plantea los problemas de un sencillo cuenco tallado, aunque el material constitutivo y su alteración sean similares. Por esta razón, ante la enorme variedad de combinaciones posibles, resulta muy útil al conservador arqueológico disponer de una amplia batería de técnicas y procedimientos para el tratamiento de la madera arqueológica de procedencia subacuática.

La consolidación mediante silicona es una nueva técnica que aún debe ser experimentada para llegar a conocer sus ventajas e inconvenientes.

La consolidación mediante silicona es una nueva técnica que aún debe ser experimentada para llegar a conocer sus ventajas e inconvenientes



➡ Madera en proceso de deshidratación /
ANA BOUZAS ABAD, IAPH

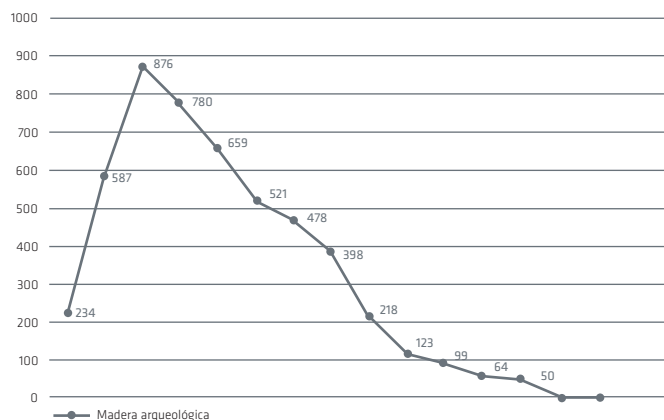


Gráfico de eliminación de sales solubles de una madera arqueológica / ANA BOUZAS ABAD, IAPH

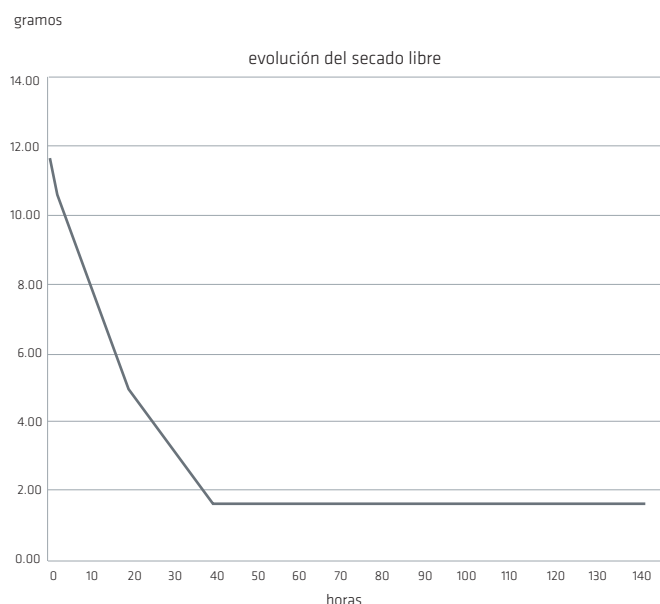


Gráfico con la evolución del secado libre / LUIS CARLOS ZAMBRANO VALDIVIA, MUSEO DE CÁDIZ

Con este objetivo surge el presente estudio realizado a partir del tratamiento de unas maderas arqueológicas en el Centro de Arqueología Subacuática del IAPH.

Para la realización del proceso de plastinación se tiene que tener en cuenta varios parámetros: el solvente en el que se va a sumergir las piezas de madera (en este caso, para la eliminación del agua) y el elastómero para rellenar las cavidades ocupadas por el agua una vez desplazada ésta.

Las fases previas del tratamiento de plastinación son las más delicadas ya que la manipulación de las piezas debe ser muy cuidadosa por su gran fragilidad.

Una vez que los objetos arqueológicos han sido extraídos del medio subacuático, metidos en bolsas de plástico y trasladados al laboratorio en cajas estancas, si es posible a resguardo de la luz, se comienza el tratamiento de estos objetos. El primer paso es la documentación fotográfica, su pesado y la medida de todos los elementos.

Una vez tomados todos los datos se pasa al tratamiento de eliminación de sales solubles por medio de baños forzados con agua desmineralizada. El agua contiene cloruros activos que son compuestos químicos muy activos inestables que están generalizados por toda la pieza. Esta eliminación se consigue renovando los baños periódicamente y tomando muestras con el fin de medir su concentración de iones Cl^- . Estos valores se expresan en S/cm (conductividad específica), aunque también pueden expresarse por el concepto de salinidad (m/l o g/l), hasta que se llegue a una concentración de 50 ppm o $24 \text{ } \mu\text{S/cm}$.

Finalizado este proceso se sumerge la pieza directamente en acetona. Los baños en este solvente sirven para ir deshidratando progresivamente la pieza. Estos se deben cambiar varias veces hasta que la deshidratación se haya completado. Durante el proceso se utilizará un acetómetro para medir la cantidad de acetona absorbida y por tanto el agua expulsada.

Cuando la deshidratación se ha completado se procederá a sumergir la pieza en aceite de silicona, genéricamente polisiloxanos, CT-32 (diacetato de dibutilestano), al cual se añadirá CR-20 (isobutil trimetoxisilano ente el 3-5%) en una cámara de vacío para que comience la fase de impregnación. De forma general los elementos que se necesitan para realizar la impregnación son: la cámara de vacío o "Campana", que es un recipiente metálico con una tapa de cristal en la que se coloca la pieza, y la bomba de vacío que extrae moléculas de gas de un volumen sellado para crear un vacío parcial. En este caso se extraerá la acetona que contiene la madera.

Esta cámara tiene un cierto número de tuberías de entrada que van conectadas respectivamente a la bomba de vacío, a un manómetro digital de alta precisión, y a diferentes tubos de plástico con llaves de paso, con las cuales se controlará el proceso de hacer el vacío en la cámara.

Una vez conectados todos los aparatos arriba mencionados se comenzará el tratamiento de impregnación. Cuando la presión de vacío llega a 5mm de Hg., se podrá dar por finalizado el tratamiento.

La pieza debe dejarse en reposo unas 24 horas y luego se extrae eliminando los excesos de silicona de la superficie. Una vez realizada esta operación se vulcaniza la silicona que impregna la pieza con el catalizador.

Se pueden emplear diferentes métodos de aplicación: mediante un pincel o pulverizando la superficie con un aerógrafo para lograr que la capa sea más uniforme y fina.

Finalizada la aplicación se introduce la pieza en una cámara con humedad relativa alta, ya que favorece el proceso de catalización, hasta que la superficie este dura.

Ya sólo queda el tratamiento final de la pieza que es la protección final con una cera que la aisle del medio ambiente y repela el polvo.

EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO

Material y método

La comparación del éxito alcanzado mediante cualquier tratamiento de conservación sobre maderas arqueológicas empapadas es complicada por la heterogeneidad del material tratado. No obstante, aunque son variados los aspectos valorables a la hora de establecer la eficacia del tratamiento (cambios de color, aumento de peso, naturalidad de aspecto, permanencia del consolidante, higroscopicidad resultante, etc.), se tiende a valorar la eficacia de uno (GRATTAN, 1982) por el grado de estabilidad dimensional alcanzada respecto de una muestra de madera secada libremente a 20° C y 50% de HR.

El método establecido por W. Grattan, denominado Índice de Eficacia Anti-contracción (ASE), se expresa en términos porcentuales considerando que el ASE = 100% corresponde a una eficacia máxima donde no hay contracción y el ASE = 0% corresponde a una contracción igual a la de la madera no-tratada (secado libre a 20° C y 50% de HR). La fórmula se expresa:

$$ASE (\%) = 100 \cdot (C_0 - C_T / C_0)$$

C_0 = contracción de la madera secada al aire libre

C_T = contracción de la madera tratada

Según esta fórmula, cuanto más cercano al valor del 100% sea el resultado de nuestro tratamiento tanto igual será la eficacia obtenida con el mismo. Previamente a la determinación del ASE (%) es necesario calcular el porcentaje de contracción individual CONT (%) de cada muestra para lo cual se emplea la fórmula:

$$CONT (\%) = 100 \cdot (S_0 - S_T) / S_0$$

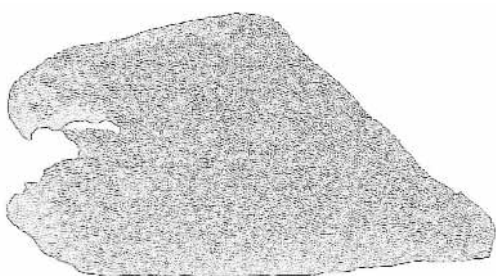
S_0 = superficie original de la madera húmeda

S_T = superficie final de madera seca

Aunque estos parámetros debieran estudiarse sobre los tres ejes principales de la madera respecto a la dirección de las fibras (longitudinal, transversal y radial), en nuestro caso el análisis se ha limitado al estudio del corte transversal debido al tamaño y forma de las muestras disponibles. Creemos no obstante que los resultados en cuanto a la evaluación de la estabilidad dimensional son suficientemente esclarecedores, tal como se demuestra a continuación, a pesar de la restricción señalada en el método.

Para realizar el estudio y valoración de la eficacia del método de consolidación mediante aceites de silicona se utilizó un pequeño fragmento de forma longitudinal desprendido de una de las piezas originales. De dicho fragmento se tomaron cinco muestras de sección transversal cuyas superficies de corte fueron escaneadas junto a un patrón de referencia para determinar mediante una aplicación informática sus áreas en mm². De las cinco muestras de madera se han tomado dos -M₁ y M₂- para ser tratadas con aceite de silicona; una -M₃- para el secado libre (50% de HR); otra -M₄- para el secado controlado (100-80%, 80-60% y 60-50% de HR en 2 semanas); y otra -M₅- como reserva húmeda sin tratar para posteriores análisis. Las probetas M₁ y M₂ destinadas a la impregnación han sido embutidas en "marcos de elastómero de silicona" para hacer una manipulación indirecta de las mismas durante el proceso y evitar el riesgo de roturas que invalidarían el estudio de eficacia.

A efecto de caracterizar la madera, se tomó una muestra cúbica de 1 cm a partir de la cual se ha determinado el contenido de humedad máxima HMAX (%) y el peso específico de la madera que es de 275% y 0,25 gr/cm³ respectivamente. Estos valores indican que se trata de una madera muy deteriorada, circunstancia que se corresponde con la cronología atribuida -época romana-, así como al medio de enterramiento -bajo el nivel freático-. Asimismo, las pruebas organolépticas demuestran un grado extremadamente bajo de resistencia a la compresión tal que la hace fácilmente desmenuzable ante la mínima presión de los dedos. La identificación anatómica no ha podido concluirse debido al estado de alteración de la madera aunque sin embargo sí permite incluirla en el grupo de las coníferas.

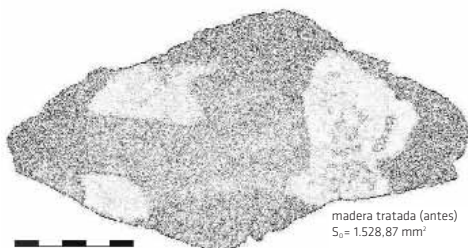


madera sin tratar (antes)
 $S_0 = 1.259,31 \text{ mm}^2$

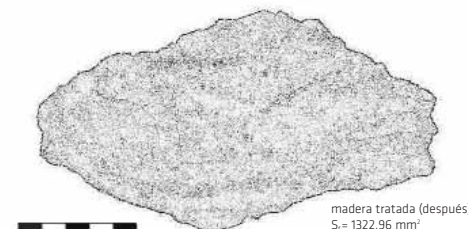


madera sin tratar (después)
 $S_f = 373,88 \text{ mm}^2$

➊ Muestra de madera sin tratar M_3 , antes y después /
LUIS CARLOS ZAMBRANO VALDIVIA, MUSEO DE CÁDIZ



madera tratada (antes)
 $S_0 = 1.528,87 \text{ mm}^2$



madera tratada (después)
 $S_f = 1322,96 \text{ mm}^2$

➋ Muestra de madera tratada M_2 , antes y después /
LUIS CARLOS ZAMBRANO VALDIVIA, MUSEO DE CÁDIZ



➌ De izquierda a derecha: madera tratada M_2 , madera sin tratar -secado controlado- M_3 , madera sin tratar -secado libre- M_4 /
LUIS CARLOS ZAMBRANO VALDIVIA, MUSEO DE CÁDIZ

Las dos probetas M_1 y M_2 han sido deshidratadas en acetona por la restauradora Ana Bouzas en el laboratorio del Centro de Arqueología Subacuática del IAPH y posteriormente impregnadas en condiciones de vacío con aceite de silicona + *cross-linker*; después han sido catalizadas en el laboratorio del Museo de Cádiz con el catalizador específico mediante aplicación con pincel y dejadas en un recipiente cerrado donde las probetas han continuado el proceso de polimerización.

Siguiendo la recomendación del fabricante, han sido incluidos dentro del recipiente una pequeña cantidad de catalizador para saturar el espacio con los vapores del mismo así como una pequeña cantidad de agua que mejora la eficacia del proceso. Al cabo de 48 horas, se ha procedido a la aplicación de *cross-linker* para eliminar los excesos superficiales de silicona formados por la exudación al exterior desde la madera. Después se ha vuelto a aplicar más catalizador con pincel.

Al final del proceso se advirtió que a pesar de las precauciones tomadas un pequeño fragmento de la probeta M_2 se había desprendido motivo por el cual esta madera quedaba invalidada para realizar los estudios dimensionales.

A continuación, presentamos los resultados:

Pieza sin tratar secada al aire libre / M_3

$S_0 = 1.259,31 \text{ mm}^2$
 $S_f = 373,88 \text{ mm}^2$ CONT (%) = 70,31

Pieza tratada con silicona / M_1

$S_0 = 1.528,87 \text{ mm}^2$
 $S_f = 1.322,96 \text{ mm}^2$ CONT (%) = 13,46

Índice de Eficacia Anti-contracción - ASE (%)

$C_0 = 70,31 \%$
 $C_t = 13,46 \%$ ASE (%) = 80,85

Interpretación de los resultados

El valor de ASE (%) resultante se sitúa en torno al 80%, aunque este dato indicativo quizás podría elevarse hasta el 90% si consideramos la pérdida de algún fragmento que falsea ligeramente este resultado. No obstante, y aunque este valor constituye un resultado aceptable, carecemos de referencias (probetas de la misma madera tratadas con métodos diferentes) para un estudio comparativo entre métodos.

Sin embargo, si tomamos los datos procedentes de estudios publicados y cotejamos el resultado obtenido como un valor relativo cuyo interés reside en la posibilidad de comparar distintos tratamientos

sobre muestras de características semejantes, podemos considerar que las maderas de Huelva, presentando un índice de ocupación de consolidante superior al 90% y experimentando una contracción del 13,46%, han respondido con éxito al tratamiento de impregnación con aceite de silicona, manteniendo una estabilidad dimensional superior a los tratamientos con PEG para maderas de características similares.

Otras consideraciones respecto a la eficacia del método son la respuesta a los cambios higrométricos de la madera tratada: 0,6% de incremento de peso frente al 9,9% de la madera sin tratar (60' / 80% HR y 19° C), y la mejora de la resistencia mecánica que a falta de ensayos técnicos concluyentes permite una manipulación aceptable para los requerimientos ordinarios del material arqueológico.

El cambio de color es una asignatura donde los consolidantes de la madera raras veces obtienen una valoración aceptable, aunque es cierto que con los tratamientos de post-polimerización (remoción de polímero con *cross-linker* y abrasión en seco con fibra de vidrio y lana de acero) es posible obtener un tono más cercano al marrón, menos oscuro, al mismo tiempo que desaparece el brillo superficial provocado por la fina capa de polímero depositada en el exterior de la pieza. La respuesta al tacto mejora considerablemente cuando se realizan estas operaciones en la superficie de la madera cuyas cualidades organolépticas ganan en naturalidad alejándose de la artificiosidad del plástico.

La irreversibilidad del tratamiento es una característica negativa que, no obstante, se mantiene en consonancia con la mayoría de los tratamientos de consolidación existentes.

La valoración general del tratamiento es positiva al obtenerse un éxito considerable en cuanto a la estabilidad dimensional de los objetos siendo este el objetivo prioritario de cualquier tratamiento. La respuesta higroscópica es prácticamente despreciable y la resistencia mecánica es sobradamente adecuada a las necesidades expositivas y de investigación. El acabado superficial y el tacto son aceptables cuando se realizan los tratamientos de post-polimerizado. Además de estos aspectos, es preciso advertir la corta duración de los procedimientos y la sencillez de la infraestructura necesaria que sin embargo tiene el problema del alto precio de la silicona.

Por todo esto concluimos que esta técnica es un recurso imprescindible para un laboratorio de materiales de procedencia subacuática ya que constituye un tratamiento fiable y rápido cuyo campo de aplicación se verá aumentado conforme se avance en la experimentación. Consideramos que resulta especialmente indicado para el tratamiento de pequeños objetos de naturaleza orgánica (madera, fibras vegetales, cuero, huesos, etc.) fuertemente hidrolizados donde las contracciones del secado resultan especialmente destructoras debido a su menor tamaño y resistencia.

Bibliografía

AMBROSE, W. R. (1970) Freeze-Drying of Swamp-Degraded Wood. *Conservation of Stone and Wooden Objects* (v. 2). London: IIC, 1970, pp. 53-57

BALTAZAR, V. DE LA CRUZ (1996) *Plastination as a consolidation technique for archaeological bone, waterlogged leather and waterlogged wood*. Master of Art Conservation Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 1996

BARKMAN, L. (1975) The Preservation of the Warship Wasa. In ODDY, W.A. (ed.) *Problems in the Conservation of Waterlogged Wood*. Maritime Monographs and Reports, n° 16. Greenwich: National Maritime Museum, 1975, pp. 65-105

BIEK, L. (1975) Some Notes on the Freeze Drying of Large Timbers. In ODDY, W.A. (ed.) *Problems in the Conservation of Waterlogged Wood*. Greenwich: National Maritime Museum, 1975, pp. 25-29 (Maritime Monographs and Reports, 16)

CETBGE (1985) Waterlogged Wood: Study and Conservation. *Proceedings of the 2nd ICOM Waterlogged Wood Working Group Conference* (Grenoble, France, 1984). Grenoble: Centre d'Etude et de Traitement des Bois Gorges d'Eau, 1985, pp. 29-31

FLORIAN, M.-L.E. (1987) Deterioration of wet organic artefacts excluding wood. In COLIN PEARSON (ed.) *Conservation of marine archaeological objects*. London: Butterworths, pp. 21-54

GRATTAN, D. W. (1982b) A practical comparative study of several treatments for waterlogged wood. *Studies in Conservation*, v. 27, 1982, pp. 124-136

GRATTAN, D. W. (ed.) (1982a) *Proceedings of the ICOM Waterlogged Wood Working Group Conference*. Ottawa: International Council of Museums (ICOM), Committee for Conservation, Waterlogged Wood Working Group, 1982

HOFMANN, P.; GEOFFREY, D. (1990) Structure and degradation process for waterlogged archaeological wood. In ROWELL, R. M.; Barbour J. (ed.) *Advances in chemistry series 225, Archaeological wood: properties, chemistry and preservation*. Washington, D.C.: American Chemistry Society, 1990, pp. 35-66

JENSSEN, V. (1987) Conservation of wet organic artefacts excluding wood. In COLIN PEARSON (ed.) *Conservation of marine archaeological objects*. London: Butterworths, pp. 122-163

JESPERSEN, K. (1982) Some problems of using tetraethoxysilane (tetraethyl ortho silicate: TEOS) for conservation of waterlogged wood. In GRATTAN, D. W. (ed.) *Proceedings of the ICOM waterlogged wood working group conference*. Ottawa: International Council of Museums (ICOM), Committee for Conservation, Waterlogged Wood Working Group, 1982, pp. 203-207

LÓPEZ DE ROMA, A. (1985) Conservación y tratamiento de maderas extraídas en un medio subacuático. En VVAA. *La madera en la conservación y restauración del patrimonio cultural*. Madrid: Ministerio de Cultura, Dirección General de Bellas artes y Archivos, Subdirección General de Arqueología y Etnología, 1985, pp. 13-30

VON HAGENS, G. (1985) *Heidelberg plastination folder: Collection of technical leaflets for plastination*. Heidelberg: Anatomisches Institut I, Universität Heidelberg, 1985

Nota

¹Se contó con el equipo de este departamento formado por José Arturo Prada Oliveira, Cristina Verástegui Escolano y José Fernández Vivero.